

ボーリング用循環泥水の流動に関する基礎的研究

著者	倉野 重光
号	611
発行年	1976
URL	http://hdl.handle.net/10097/9347

氏 名	くら の しげ みつ 倉 野 重 光
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 5 2 年 3 月 2 5 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項
研 究 科 , 専 攻 の 名 称	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 (博 士 課 程) 資 源 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	ボ ー リ ン グ 用 循 環 泥 水 の 流 動 に 関 す る 基 礎 的 研 究
指 導 教 官	東 北 大 学 教 授 川 島 俊 夫
論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授 川 島 俊 夫 東 北 大 学 教 授 堀 部 富 男 東 北 大 学 教 授 下 飯 坂 潤 三 東 北 大 学 教 授 斎 藤 正 三 郎

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

採油や採ガス用のボーリングなどにおいて用いられる泥水は、その目的上循環をしながら、ビットで掘り起した掘りくづを地表まで運搬したり、孔壁の崩壊を防止したり、地下に存在する油などの噴出を防いで、ボーリングが安全かつ迅速に行われるために使用されるものである。この泥水に関する研究は調泥などその物性の解明に主力がおかれ、流動特性についてはあまり行われていない現状にあるが、流動特性に関する研究は、掘くづの運搬能力、および泥水の流動抵抗の計算、また、泥水循環系統の設計、地層への濾過水浸入量の推定など、実用上極めて重要な課題である。

さて、現在、泥水としては、ベントナイト泥水が主に使用されているが、従来の研究をみると、ベントナイト泥水の流動をビンガム流れとみなして解析を試みている例がある。しかし、その根

抛は必ずしも十分とはいえないところである。これはビンガム流れとみなす理由が十分でなく、泥水の組成、作業の条件によっては他の非ニュートン流れとみた方が良いと考えられるからである。

本研究は、ボーリングの作業時に必要な循環泥水の流動をケーシングあるいはボアホールとロッド間の流れ、すなわち外管の内壁面が滑らかな場合と粗い場合の二重管内非ニュートン流れとして取扱い、泥水の循環に必要な所要動力を決定するために、その層流流れおよび乱流流れにおける圧力損失を求めうる計算法を確立することを目的とした。このため、基礎的研究として、ベントナイトスラリーを泥水として用い、単一円管内の圧力損失の測定結果より、擬塑性流体模型が適用できることを確かめたので本研究においては、擬塑性流れとみなし考察した。均質なベントナイトスラリーは上昇流および水平流のいずれの場合も同じ流動様式を示すこと、ならびに、内管の回転が圧力損失におよぼす影響は少ないことを確かめた後、二重管内上昇流に関し内管の非回転の場合について、管摩擦係数とレイノルズ数との関係を示す無次元表示式の誘導を試みた。

第2章 擬塑性流体の二重管内層流流れに関する研究

ベントナイトスラリーに関し、4種の管径について単一円管内層流流れの圧力損失を水平管により測定し、その結果に基づいて、十分な精度で擬塑性流体模型が適用できることを確かめた。さらに、二重管内層流流れの圧力損失を2種の管径比とベントナイトスラリーの3種の比重量について内管が静止の場合と回転している場合に関し実験を行い、管径比、比重量および回転数の変化による圧力損失への影響を考察した。この結果、著者がFredricksonらの流量公式に基づいて行った理論的解析と比較検討を試み、次のことが結論として得られた。すなわち、二重円管内流動に擬塑性流体模型を適用させた場合の、その模型のもつ零障害のために理論値と実験値とが一致しないと従来いわれていたが、著者が提案する組合せによる方法によって二重管内の流動より構造粘度指数 n と擬塑性粘度 K を求めれば流量（あるいは流速）と圧力損失との関係を十分な精度で推算し得ることが明らかとなった。

また、流量と圧力損失の関係から、二重円管内擬塑性流体についての相似則、すなわち、管摩擦係数とレイノルズ数との関係を次式のように誘導することができた。

$$f = \frac{D_o(1-k)}{2\rho V^2} \frac{\Delta p}{L} \quad \text{Rep} = \frac{2^{3-n}\rho V^{2-n}}{(1-k)K} \left\{ \frac{1-k^2}{D_o \Delta p} \right\}^{-n}$$

ここに、 f = 管摩擦係数 Rep = レイノルズ数 V = 平均流速 D_o = 外管直径
 L = 測定区間長さ k = 管径比 Δp = 単位長さ当りの圧力損失 ρ = 流体の密度
 n = 構造粘度指数 K = 擬塑性粘度

さらに、二重管の内管が回転する場合の圧力損失におよぼす影響は、本実験範囲内ではあまり大きくないことがわかり、かつ、著者が求めた相似則によれば回転しない場合の管摩擦係数と修正レイノルズ数との関係により十分に圧力損失が算出できることが明らかとなった。

第3章 擬塑性流体の二重管内乱流流れに関する理論的研究

本章では、内管が静止の場合について、レイノルズ数の範囲を拡張した擬塑性流体の二重管内乱流流れに関し解析を行った。

著者は、従来 Millikan によりニュートン流体の単一円管内乱流流れに関して用いられた次元解析的手法を擬塑性流体の二重管内乱流流れに適用し、管摩擦係数とレイノルズ数に関する無次元表示式の誘導を試みた。

このため、擬塑性流体の二重管内乱流流れの外管域の速度分布が単一円管内乱流速度分布と等しいと仮定して、混合定数を Dodge らの提案する式より求めた。また、最大速度の位置 λ は構造粘度指数 n により影響を受けず、ニュートン流体の最大速度の位置と同じであるとする Barrow らの提案する式により求め得ることを確かめた。さらに、乱流領域における管摩擦係数とレイノルズ数の関係として、次の無次元表示式を誘導した。かつ、この無次元表示式に含まれる諸因子間の関係を数値計算によって明らかにした。

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = G_0 \log \text{Rep} f^{1-\frac{n}{2}} + H_0$$

ここで

$$G_0 = 1.628 A_{onk} \sqrt{\frac{1-\lambda^2}{1-k}}$$

$$H_0 = 1.628 A_{onk} \sqrt{\frac{1-\lambda^2}{1-k}} \log \frac{(1-k)(1-\lambda)^n}{2^3} \left\{ \frac{1-\lambda^2}{2(1-k)} \right\}^{1-\frac{n}{2}} \left\{ \frac{1-k^2}{2p} \right\}^n$$

$$+ B_{onk} \sqrt{\frac{1-\lambda^2}{2(1-k)}} - \frac{n}{\sqrt{2(1-k)(1-k^2)}} \left\{ (1-\lambda^2)^{3/2} A_{onk} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{1+\lambda} \right) \right. \\ \left. + \frac{(\lambda^2-k^2)^{3/2}}{k^{1/2}} A_{ink} \left(\frac{1}{2} + \frac{k}{k+\lambda} \right) \right\}$$

$$A_{ink} = \sqrt{\frac{k(1-\lambda^2)}{\lambda^2-k^2}} A_{onk}$$

ここに

λ = 最大速度の位置までの無次元距離

A_{onk} , A_{ink} , B_{ink} = 構造粘度指数 n と管径比 k の関数となる内管域および外管域における無

次元数

なお、著者が誘導した管摩擦係数に関する無次元表示式は、構造粘度指数 $n = 1$ の場合はニュートン流体に、また管径比 $k = 1$ の場合は単一円管内流れにも適用し得ることを併せ明らかにした。

第 4 章 二重管内乱流流れの速度分布に関する実験的研究

著者は第 3 章において擬塑性流体の二重管内乱流流れを論じ、二重管断面における外管域および内管域の速度分布と最大速度の位置を仮定することにより、圧力損失に関する無次元表示式を求め得た。

本章においては、無次元表示式の誘導過程で導入した仮定の妥当性を証明するために、著者が製作した速度分布測定装置により、擬塑性流体の二重管内乱流流れの速度分布を管径比 6 種類、比重量 4 種類について測定し、考察した。この結果理論的に平均流速を求め得る方法を明かにし、それによる予測値と実測値を比較することができた。また、実測結果より、二重管内乱流流れの最大速度の位置は、本実験範囲内においては、管径比 k のみに依存し、レオロジー定数 n 、 K の影響を受けないこと、ならびに、二重管内乱流流れの外管域の速度分布は単一円管の速度分布に等しいことを確かめることができた。さらに円管域の速度分布は、管径比 k の影響を受け、管摩擦係数の無次元表示式の関係 $Go = Gi$ と最大速度の位置における境界条件より、外管域の速度分布定数と関係づけて次式で表示されることを明らかにした。

$$\frac{u_i}{u_i^*} = Aink \ln Z \eta_i^n + Bink$$

$$Aink = Aonk \sqrt{\frac{k(1-\lambda^2)}{\lambda^2 - k^2}}$$

$$Bink = \sqrt{\frac{k(1-\lambda^2)}{\lambda^2 - k^2}} \left[Aonk \ln \left\{ \left(\frac{1-\lambda}{\lambda-k} \right)^n \left(\frac{k(1-\lambda^2)}{\lambda^2 - k^2} \right)^{1-\frac{n}{2}} \right\} + Bonk \right]$$

ここに u_i = 内管域の局部速度 u_i^* = 管摩擦速度 η_i = 内管壁面からの無次元距離
また、著者は乱流流れに関する速度分布式より平均流速を次式で表わすことができた。

$$V = u_o^* \left[Aonk \ln \left\{ \frac{R_o^n \rho u_o^{*2-n}}{K} (1-\lambda)^n \right\} + Bonk \right] - \frac{n}{2(1+k)} Aonk u_o^* (3+3k-2\lambda)$$

第5章 二重管内乱流流れの圧力損失に関する実験的研究

本章では滑面二重管内擬塑性流体の乱流流れの圧力損失に関し、レオロジー定数 n を 1.0 から 0.760 までの 4 種類、管径比 k を 0.118 から 0.642 までの 6 種類変化させて実測し、第3章において誘導した乱流流れの圧力損失に関する無次元表示式より得られる計算値と実験結果より得られた値とを比較検討した結果、両者が精度よく一致することを確認した。

また、与えられたレオロジー定数 n と管径比 k について理論的に計算される管摩擦係数 f_{th} と実験結果から求められた管摩擦係数 f_{ex} について比較したところ大部分のデータはその誤差が $\pm 2.5\%$ 以内におさまることを確認した。

第6章 粗面外管壁を有する二重管内擬塑性流れに関する研究

実際のボーリング用泥水の流動は、ケーシングとロッド間の流れのごとく壁面の滑らかな場合ばかりでなく、素掘りの状態、すなわち壁面の粗いボアホールとロッド間の流れをも考えねばならない。

粗面円管内の流れに関しては、一般に管壁面の粗さの表示が困難なために不明な点が多い。Nikuradse は、ニュートン流体の円管内乱流流れについて管の内面に篩分けして大きさをそろえた砂を附着させて実験を行った。

この場合は、砂の大きさを ϵ で表わし、管直径 Do に対する相対粗度 ϵ/Do によりかなり定量的に粗さを表現した。著者は壁面の粗いボアホールを想定した壁面粗さの異なる 2 種のコンクリート管を用い、これを外管として内管の管径比を 2 種類変えて圧力損失に対する外管壁面粗さの影響を実験的に考察した。

コンクリート管の内壁面粗さの表示は JIS B 0601 による十点平均粗さ e によったがその相対粗度 e/Do の値は 0.0080, 0.0011 であった。

この表示法は Nikuradse による表示法とはだいぶ異なるが、実際のボアホールの壁面粗さを表示する方法としては適していると考えて考察した。この結果、層流流れにおいては、壁面の粗さの影響は現れず、管摩擦係数 f とレイノルズ数 Rep の関係は次式で表わされることを確認した。

$$f = 16/Rep$$

また、粗粒のすべてが層流底層から突出した完全乱流の領域では、圧力損失はレイノルズ数 Rep に無関係となり、管摩擦係数は次式により求めることができた。

$$1/\sqrt{f} = A - G_0 \log e/Do$$

ただし、 A は次式により与えられ、 G_0 は前述のとおりである。

$$A = -2.259G_0 + 9.319$$

さらに，実験データに基いて，完全乱流が始まるレイノルズ数に関する実験式を次のように得た。

$$\log \left[\text{Rep} \cdot f^{1-\frac{n}{2}} \cdot e/Do \right] = 4.53n - 0.73k - 2.98$$

第7章 結 論

以上，各章において述べたように，擬塑性流体の滑面および粗面外管壁を有する二重管内の層流流れおよび乱流流れにおける管摩擦係数とレイノルズ数とに関する無次元表示式を提案した。かつ，内管の回転が圧力損失におよぼす影響の微少であることを明らかにするとともに管径比，およびレオロジー定数の変化が圧力損失におよぼす影響を理論的ならびに実験的に考察した。さらに，擬塑性流体の二重管内流動に関し，圧力損失ならびに速度分布に関する詳細な基礎資料を得た。

以上，二重管内擬塑性流動を解析することにより，ボーリングのさいの循環泥水の流動に関し，新しい知見を得ることができた。

審 査 結 果 の 要 旨

油井のボーリングの際に、練り粉の排出、孔壁の保護などのために、ベントナイトスラリーを主とした泥水循環が行われるが、この泥水に関する研究は、従来その物性に限られ、流動特性については極めて少なく、特に二重管内の流れについては未だ見当らない。したがって、このような管内流れに対する所要動力算定に極めて重要な因子である圧力損失を的確に推定することができない現状にある。

本論文は擬塑性流れを示すベントナイトスラリーを泥水として使用し、二重管内上昇流に関し、予め内管の回転が圧力損失におよぼす影響の度合の少ないことを確かめた後、内管非回転の場合について、層流および乱流域におけるレイノルズ数との関係が無次元表示式から算出される管摩擦係数と圧力損失から得られるその実測値との対比を試み、さらに、外管の内壁面の粗度が圧力損失におよぼす影響を考究したもので、全篇7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、擬塑性流れの層流域に関し、内管の非回転の場合に較べ、その回転が圧力損失におよぼす影響は僅少であることを示している。

第3章では、乱流流れについて解析を行い、管摩擦係数とレイノルズ数とに関する新しい無次元表示式を得ている。これは二重管内擬塑性流れの圧力損失の表示に関する有用な知見である。

第4章では、まず二重管内乱流流れの速度分布を実測し、これと単管の場合の速度分布が外管域に関しては、そのまま適用されるとする仮定に基づく計算値とがよく合うことを確かめた。これが第3章の解析手法の基になっているものである。次いで、上記の実測より得られる平均流速の値と著者の求めた速度分布式より得られる計算値とがよく一致することを明らかにしている。さらに、最大速度の位置などについても検討を行っている。これらは貴重な成果である。

第5章では、圧力損失の実測値と第3章で得られた圧力損失に関する無次元表示式による計算値との比較を行い、両者が精度よく合致することを確かめている。

第6章では、外管の内壁面が粗い場合に対して、層流および乱流域における圧力損失を実測し、管摩擦係数とレイノルズ数とに関する粗度の影響を考慮に入れた新しい実験式を提示している。これは極めて有意義なものと認められる。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は擬塑性流体を用い、二重管内上昇流における管摩擦係数とレイノルズ数とに関する無次元表示式を提案し、かつ圧力損失ならびに速度分布について広範な基礎資料を得るとともに、内壁面粗度の影響を精査するなどボーリングの際の泥水の流動に関し、新知見を得たもので、資源工学上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。